



기후변화에 따른 무 밭의 온실가스 배출량 모의

Simulation of the GHG Emissions Impact on Climate Change from Radish Field

신민환* · 이수인* · 장정렬** · 신재영* · 박윤식*** · 임경재* · 최중대*[†]

Shin, Min Hwan · Lee, Su In · Jang, Jeong Ryeol · Shin, Jae Young · Park, Youn Shik · Lim, Kyoung Jae · Choi, Joong Dae

Abstract

This study was conducted to predict greenhouse gas (GHG) emission from a radish field by future climate change scenario. A radish field located at Chuncheon-si Gangwon-do was selected, and A1B Special Report on Emission Scenario (SRES) of the IPCC (Intergovernmental panel on climate change) was applied to simulate the future potential climate change. Rainfall and temperature data were predicted to be increased by 8.4 % and 1.9 % in 2040s, 35.9 % and 27.0 % in 2060s, 19.2 % and 30.8 % in 2090s, respectively, compared to the climate data in 2010s. The N₂O, CO₂, and CH₄ emission were estimated to be increased by 0.4 up to 2.4 kg/ha/yr, by 500.5 up to 734.5 kg/ha/year, and by 29.4 up to 160.4 kg/ha/yr, which were resulted from the global warming potential (GWP) of 14.5~21.7 CO₂/ha/year caused by the amount changes of rainfall, temperature, manure amendment, and fertilizer applied in fields. One distinct feature of the study result was that the changes of N₂O-N, CH₄-C and CO₂-C with future potential climate change simulation were varied by soil texture. Therefore it was concluded that there is a need to apply appropriate amount of manure amendment needs and to consider soil texture as well.

Keywords: Climate change; DNDC; GHG; Field; SRES

1. 서 론

18세기 이후 온실가스의 대기 중 농도가 중요한 문제로 대두 되었으며, 온실가스로 인해 지구온난화와 기후변화에 많은 영향을 주고 있다. 이처럼 기후변화를 유발하는 물질은 온실가스 (greenhouse gas)라 부르며, 지구 대기는 질소 78 %, 산소 21 % 그리고 나머지 아르곤, 이산화탄소, 수증기 등이 1 % 등을 차지한다. UN 기후변화협약은 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소 (HFC), 과불화탄소 (PFC), 육불화황 (SF₆)을 직접 온실가스로 정의하고 있다. 이중 농업지역에서 배출되는 온실가스는 크게 이산화탄소, 메탄 그리고 아산화질소 등 3가지이다 (Gregorich et al. 2005). 특히, 아산화질소는 지구 전체 온실가스의 57 %가 대기중으로 배출된다 (IPCC, 1997). 여기서, 농업부문에서 배출되는 온실가스 중 아산화질소의 대기 중 농도는 2008년 기준으로

321.8 ppb이지만 지구온난화잠재력은 이산화탄소의 310배 (메탄은 21배)에 이르러 무시할 수 없는 온실가스이다. 아산화질소의 배출은 인간에 의한 생물학적 배출과 비생물학적 배출로 구분되며, 주 배출원은 농업활동 과정에서 발생하는 생물학적 배출이다 (Bouwman et al., 1995; Mosier et al., 1995). 농업활동에서 사용되는 질소질 화학비료와 가축분뇨 등으로 발생하는 아산화질소는 지구온난화를 가속시키는데 5 % 이상 기여하고 있는 것으로 보고하고 있다 (IPCC, 1996). CAST et al (1992)은 대기중으로 배출되는 아산화질소의 총 배출량 중에서 13 %는 농경지의 화학비료 사용에 의한 배출이라고 보고한 바 있으며, 농경지에서 대기로 배출되는 아산화질소의 81 %가 사용된 질소비료에 의해 배출된다고 보고된 바 있다 (Iserman, 1994). 이와같이 농경지에서 사용한 질소가 암모니아나 질소산화물의 형태로 사용된 질소원의 종류와 기후, 토양수분, 토양온도, 시비방법, 형태 등에 따라 차이가 크다.

우리나라는 2020년까지의 온실가스 배출량 감축목표를 배출전망치 (BAU) 대비 30 %로 결정함에 따라 농업부문에서도 국가전략에 부응할 수 있는 온실가스 감축기술을 개발하고 농업 현장에 보급할 수 있는 방안 모색이 시급한 실정이다. 농업은 용수, 비료, 유기물 관리 등 영농방법에 따라 온실가스 감축비용 없이도 온실가스 배출량을 줄일 수 있기에 때문에 국가 온실가스 감축을 선도하는 녹색산업으로서 중요한 역할을 수행할 수 있다 (Rural Development Administration,

* Regional Infrastructure Engineering, Knagwon National University

** Rural Research Institute

*** Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6464 Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

Received: February 11, 2015

Revised: July 10, 2015

Accepted: July 14, 2015

2010). 국내의 기후변화 관련 연구는 지구온난화의 원인이 되는 미량기체들 가운데 CH_4 , N_2O 등의 발생과 지구온난화와 대기 CO_2 농도 증가에 따른 농업생태계의 변화 예측연구 (Lee, 2005), 환경부문의 온실가스 저감 잠재력 평가 (Ministry of Environment, 2000), 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사 (Korean Society for Atmospheric Environment, 1999) 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계 구축 (Ministry of Environment, 2002), 매립시설, 하폐수시설, 소각시설에서 배출되는 온실가스 배출량 통계와 관련된 기존연구의 분석 (Jeon et al., 2007) 등이 진행되었다. 그러나 기존 연구는 배출량 조사와 관련한 내용으로 농업에서 온실가스 저감과 관련한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 농경지에서 발생하는 온실가스의 정량적 연구가 필요한 실정이며, 이를 이용한 온실가스 배출특성을 분석할 필요가 있다.

그러나 농경지 온실가스 배출량을 평가하기 위해서는 지속적인 실측 조사를 통해 비교 분석해야 하지만 많은 시간과 경제적인 투자가 요구된다. 이에 국외 많은 연구자들은 Denitrification-Decomposition (DNDC) 모델을 활용하여 농경지에서 발생하는 온실가스 배출량을 예측하였다 (Dai et al. 2012; Follador et al. 2011; Gregorich et al. 2005; Wang et al. 2011). DNDC 모델은 토양 중 질소와 탄소의 순환과정을 종합하여 토양에서 질소고정과 탈질에 의한 아산화질소 배출량과 작물의 뿌리 호흡과 분해에 의해 배출되는 이산화탄소 배출량을 예측하기 위해 개발되었다. Kwack et al. (2011)은 녹차 밭에서 발생하는 N_2O 배출량을 산정하는데 Denitrification-Decomposition (DNDC) 모델을 이용하였으며, Li et al., (2014) 등은 중국 북부지역의 집중 재배 지역에서의 질산염 침출을 예측하기 위하여 DNDC 모델을 이용하여 모의하였다. 그러나 국내에서는 농경지에서 발생하는 온실가스의 정량적 연구가 미흡한 실정이며, 미래 기후정보에 대한 국내 밭지역의 온실가스 배출량 모의 또한 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 강원도 춘천시에 위치한 무 밭에서 조사한 영농자료를 모델의 입력자료로 하여 DNDC 모델을 이용하여 온실가스 배출량을 모의하고, 기후변화에 따른 밭에서의 온실가스 배출량 변화를 분석하고자 하였다. 또한 온실가스 배출특성에 따른 저감 방안을 모색하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 기후변화 시나리오

연구대상지역은 강원도 춘천시에 위치하고 있으며, 춘천시의 기후변화를 분석하기 위하여 기상청의 기후변화정보센

터 (Climate change information change, CCIC)에서 과거자료와 기후변화 자료를 제공받아 분석하였다. 기후변화 시나리오 오는 크게 Representative Concentration Pathway (RCP)와 SRES 시나리오가 있다. 두 시나리오는 공간범위와 시간범위 그리고 공간해상도에 따라 전지구 전망자료, 한반도 전망자료, 고해상도 전망자료, 그리고 기후 극한지수로 구분 된다. 그러나 기상청의 자료는 지역별로 편이보정을 하여 자료를 활용하여야 하지만, RCP 시나리오의 경우 과거자료를 제공하고 있지 않아 편이보정을 위한 시간범위가 충분하지 않으며, SRES 시나리오 중 고해상도 전망자료나 기후 극한지수 시나리오는 한반도 전망자료 시나리오보다 시간범위와 공간해상도가 편이보정과 해상도에서 적절하지 않다. 본 연구에서는 SRES A1B 시나리오 중 한반도 전망자료를 선정하여 분석하였다. A1B 시나리오의 경우 공간해상도가 약 27 km이며, 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로써 많은 연구자들에 의해 사용되었다 (Kwon et al., 2008; Park et al., 2010; Yun et al., 2011).

기상청 자료는 월별 및 일별 강우량 자료와 최고온도, 최저온도의 데이터를 2020s (2010~2039), 2050s (2040~2069), 2080s (2070~2099)으로 구분하여 미래의 강우량과 기온의 변화를 분석하였다. 시나리오 결과는 결과의 신뢰성을 높이기 위해 과거 32년 (1980~2011) 자료를 이용하여 편이보정 (Bias Correction) 하였으며, 온실가스 모의의 입력자료로 활용하였다.

2. DNDC 모델

Fig. 1은 New Hampshire 대학의 지구, 대양과 우주 연구소에서 제공한 DNDC 모델 (ver. 9.5)의 가이드라인에서 발췌한 DNDC 모델의 구조이다. DNDC 모델은 Fig. 1과 같이 탄소 (C)와 질소 (N)의 생지화학적 순환과 생태활동 사이의 결합을 형성한다. 즉, 농업 생태계의 탄소와 질소의 생지화학적 과정에 기반을 둔 모델이다. DNDC 모델은 두 개의 성분으로 구성되어 있는데, 첫 번째 구성요소는 토양기상과 작물의 성장과 분해 등의 부모모델로써 토양온도, 수분, pH, 산화환원전위 (Eh)와 생태활동 (예: 기후, 토양, 식물 및 인위적 활동에 의해 발생) 등의 변화요소에 따라 모의한다. 두 번째 구성 요소는 질화, 탈질 및 발효 부 모델로 이산화탄소 (CO_2), 메탄 (CH_4), 암모니아 (NH_3), 질소산화물 (NO), 아산화질소 (N_2O) 및 이질소 (N_2)의 배출량을 모의한다.

작물 매개 변수의 그룹은 작물을 결정하기 위해 사용자가 입력하거나 수정할 수 있다. 작물 매개 변수는 최대 생산량, 바이오매스, 탄질비 (C/N), 계절적 누적 온도, 물 소비량과 질소 고정능 등을 포함한다. 작물의 성장은 일별로 누적온도, 질소 요구량, 수분 스트레스에 의해 모의된다. 이러한 작물 매개변

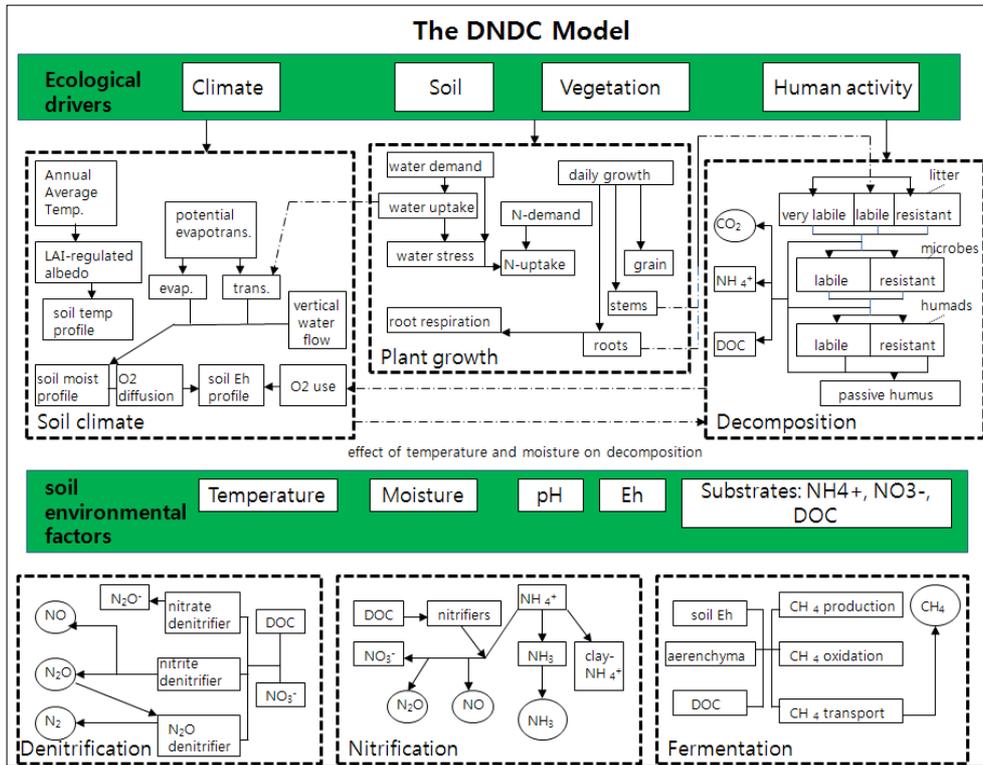


Fig. 1 Structure of the DNDC model (<http://www.dnnc.sr.unh.edu>)

수는 사용자가 prompt 모드에서 매계변수를 수정할 수 있게 하기 위하여 사용자의 입력 인터페이스에 접근할 수 있다. 질소의 작물 소요량은 일 작물 생육상황과 작물의 탈질비의 최댓값을 기본으로 계산하며, 수확 후 뿌리 바이오매스는 토양에 남게 되며, 무경운의 경우 실제 그루터기 밭에 경운을 할 때 까지 토양 표면에 잔여물이 남는 것으로 사용자가 결정 할 수 있으며, 관행 경운의 경우 토양으로 잔여물이 남는 것으로 설정 할 수 있다.

DNDC에서 4가지의 주요 토양유기물질은 토양유기탄소의 주요 공급원으로 식물잔사, 미생물 바이오매스, 활성 부식질 (humads) 그리고 비활성 부식질 (passive humus)로 구분할 수 있다. 각각의 주요성분은 두 개 또는 3개의 다양한 분해율을 가진 공급원으로 구성된다. 또한, 대기의 암모니아 휘발은 토양의 환경요소 (온도, 수분, pH) 등의 조건과 토양의 액상내의 암모니아 농도에 의해 조절된다. 그리고 모델의 모의 과정에서 혐기성 상태의 간단한 유도방식은 토양구성내의 산소 또는 다른 이산화질소 성분을 계산함으로써 예측한다. 혐기성 상태가 증가할 경우 용해유기물탄소, 암모늄, 질소 등의 물질은 탈질화반응을 높여 혐기성 미세공극으로 구분되어진다. 그러나 혐기성 상태가 감소할 경우, 호기성 미세공극내에 물질들이 재 구분으로 질산화를 높이게 된다.

3. 밭의 온실가스 배출모의

DNDC 모델을 이용하여 과거 10년의 온실가스 배출량과 기후변화에 따른 2020s, 2050s, 2080s의 온실가스 배출량을 모의하였다. 온실가스 배출량을 모의하기 위하여 연구지역의 모델 입력자료 (기후, 작물재배, 토양특성 등)를 구축하였다. 기후자료는 기후변화에 의해 분석한 자료 (최고온도, 최저온도, 강수량)를 입력자료로 활용하였으며, 토양자료는 한국토양정보시스템 (<http://asis.rda.go.kr/>)에서 제공하는 자료와 연구대상지역에서 분석한 자료를 이용하여 입력 자료를 구축하였다. 또한 작물재배 조건의 입력 자료는 무 시험포에서 실제 영농활동과 동일하게 재배한 파종일, 수확일, 비료 및 거름 사용량 등의 기초자료를 이용하여 모델 입력자료로 활용하였다. 온실가스 배출모의를 위한 입력자료는 Table 1~2와 같다. Table 1은 연구지역에서 실제 적용 및 분석한 입력자료이며, Table 2는 재배작물, 토양특성, 경운방법, 비료와 거름 등의 영농방법에 따라 변화하는 온실가스 배출량을 모의하기 위한 입력자료로 활용하였다. 무 시험포의 기존 입력자료를 토대로 질소 비료량 증감, 거름 사용량 증감, 강수량 및 온도의 증감, 토양특성의 변화 등을 가정하여 온실가스 (N₂O, CH₄, CO₂ 등)와 net GWP (지구온난화 잠재력) 배출량의 결과 값 변화를 분석하였다. 여기서 나타낸 GWP는 CO₂, CH₄,

Table 1 Characteristics of the field experimental site in this study

Climate			
Site	Latitude	N concentration in rainfall (ppm)	Atmospheric background CO ₂ con. (ppm)
Chuncheon	37	1,6	395.7
Soil			
Land-use type	Bulk density (g/cm ³)	pH	SOC
Sandy loam	1,54	5,6	0,013224
Cropping			
Crop	Tillage	Fertilizer (kg/ha)	Manure (kg/ha)
Radish	Ploughing with moldboard	Urea : 350, 15 Nitrate : 96	1,800

Table 2 Input field management data for analysing GHG emission under different cropping system

Soil	Cropping	
Land-use type	Crop	Tillage
Sandy loam Loamy sand Silt loam Loam	Radish	Ploughing with moldboard Only mulching
Cropping		
Fertilizer (kg/ha)	Manure (kg/ha)	
Urea : 350-15 Nitrate : 96	1,800	
Urea : 200-15 Nitrate : 96	2,700	
Urea : 500-15 Nitrate : 96	900	
Urea : 350-15 Nitrate : 50		
Urea : 350-15 Nitrate : 150		
Urea : 350-15 Nitrate : 200		

N₂O의 배출량에 대한 net balance를 모두 CO₂ 상당량으로 환산한 값으로써, CO₂ 배출량은 1배, CH₄ 배출량은 21배, N₂O 배출량은 310배를 곱하여 합한 값으로 산정이 된다 (IPCC, 1996). 또한 온실가스가 CO₂와 비교하여 지구온난화에 기여하는 정도를 나타내는 것으로 지구온난화 문제에 대처하기 위한 정책이나 계획을 실행할 수 있는 안전을 마련하는데 사용된다.

III. 결과 및 고찰

1. 시나리오에 의한 기후변화

SRES A1B 시나리오 결과 연구지역의 강수량과 온도자료는 과거 32년 실측자료에 비해 모두 과소 추정 된 것으로 나타나 강수량은 1.56과 온도는 4.32 값을 이용하여 편이보정

하였다. 과거 32년 연평균 강수량은 1,356.8 mm 인 것으로 나타났으며, 편이보정 후 기후변화에 의한 연평균 강수량은 1,371.4 mm (2020s), 1,557.2 mm (2050s), 1,566.5 mm (2080s)로 각각 1.1 %, 14.8 %, 그리고 15.5 %가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 과거 32년 평균 온도는 6.8 °C로 나타났다. 기후변화에 의한 평균온도는 기준 년 (1980~2011)에 비해 7.4 °C (2020s), 8.7 °C (2050s), 10.3 °C (2080s)로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화에 의해 각각 0.6 °C, 1.9 °C, 그리고 3.5 °C가 증가하는 것이다. 시나리오에 의한 기후변화 결과는 최대온도, 최소온도, 평균온도 그리고 강수량 등을 DNDC 모델의 일별 입력자료로 활용하였다.

2. 밭의 온실가스 배출량

밭에서 실제 측정된 입력자료(영농활동 자료)와 최근 10년간 (2002~2011)의 기후(강수량, 온도)자료를 이용한 온실가스 배출량은 Fig. 2와 Table 3~4와 같다. 연구지역의 2002년부터 2011년까지의 평균 강우량과 기온은 1,448.8 mm와 11.5 °C 인 것으로 조사되었다. 이때 CO₂는 평균 51.78 kg C/ha/yr의 양을 토양이 흡수하는 것으로 나타났으며, CH₄도 마찬가지로 평균 2.45 kg C/ha/yr의 양을 토양이 흡수하는 것으로 나타났다. 반면 N₂O는 평균 35.71 kg N/ha/yr의 양을 배출하는 것으로 나타났으며, 이를 이용하여 산정한 GWP는 17.1 t CO₂-eq./ha/yr의 배출량으로 나타났다. 온실가스 배출량의 경향을 살펴보면 CO₂와 CH₄의 배출량은 증가하는 것으로 나타났으나, N₂O의 배출량이 감소하여 지구온난화잠재력 (GWP)이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구결과는 실제 측정된 온실가스 자료를 가지고 비교한 결과가 아니기 때문에 온실가스의 정량화가 어렵다. 다만, 강수량과 온도의 변화로 인해 변화하는 온실가스의 경향을 파악하는데 도움이 될 것으로 보여진다.

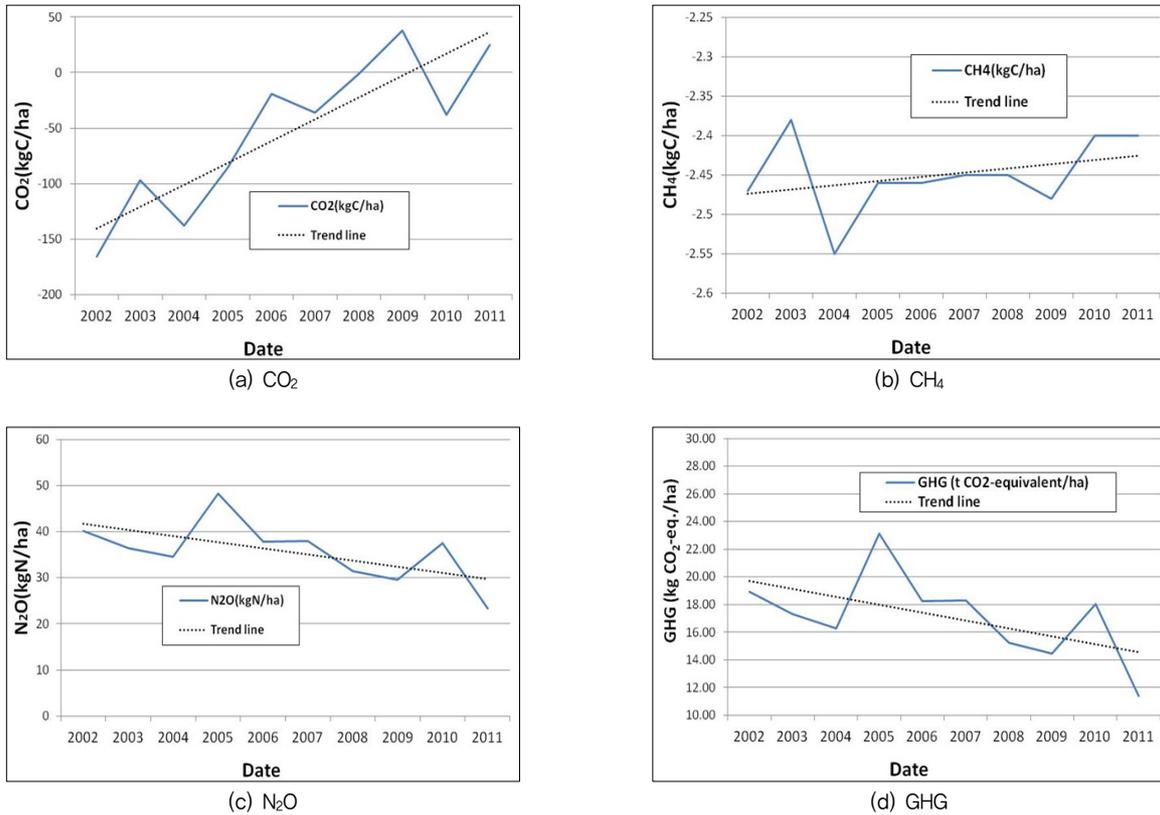


Fig. 2 The simulated results of GHG according to measured data at field

Table 3 The simulated results of GHG and biomass based on field management data

Period	Precip. (mm)	Temp. (°C)	Biomass (kgC/ha/yr)	CO ₂ (kgC/ha/yr)	N ₂ O (kgN/ha/yr)	CH ₄ (kgC/ha/yr)
2002	1,177.7	11.6	2,055	-165.95	40.22	-2.47
2003	1,868.3	11.4	2,467	-96.87	36.42	-2.38
2004	1,405.0	12.0	1,623	-137.74	34.57	-2.55
2005	1,334.8	11.1	1,192	-85.98	48.23	-2.46
2006	1,659.4	11.6	1,654	-19.47	37.76	-2.46
2007	1,374.9	11.8	2,262	-35.76	38.01	-2.45
2008	1,439.4	11.4	1,220	-0.81	31.39	-2.45
2009	1,446.9	11.5	1,962	38.02	29.59	-2.48
2010	1,581.4	11.0	1,850	-38.00	37.51	-2.40
2011	1,200.3	11.4	3,349	24.77	23.35	-2.40
Avg.	1,448.8	11.5	1,963	-51.78	35.71	-2.45

3. 미래 기후변화에 의한 밭의 온실가스 배출량

실제 측정된 입력자료 (영농활동 자료)와 미래 기후변화자료 (2011~2099)를 이용하여 분석한 온실가스 배출량의 변화는 Fig. 3~7과 Table 5~6과 같다. Fig. 5와 Fig. 7의 (a)와 같이 연구지역의 N₂O 배출량은 16.66~42.19 kg N/ha/yr로 나타났

으며, 기간별로 살펴보면 평균 24.54 kg N/ha/yr (2020s), 평균 27.06 kg N/ha/yr (2050s), 그리고 평균 31.72 kg N/ha/yr (2080s)로 나타나 연구지역은 기후변화에 의해 N₂O 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, Fig. 7의 box plot은 가장 상단의 점과 하단의 점은 최댓값과 최솟값을 의미하며, 점

Table 4 The simulated results of GWP based on field management data

Period	GWP (kg CO ₂ -equivalent/ha/yr)			GHG (t CO ₂ -eq./ha/yr)
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
2002	-608,0	19,592,9	-69,3	18,92
2003	-354,9	17,741,7	-66,8	17,32
2004	-504,7	16,840,5	-71,5	16,26
2005	-315,0	23,494,9	-69,0	23,11
2006	-71,3	18,394,5	-69,0	18,25
2007	-131,0	18,516,3	-68,7	18,32
2008	-3,0	15,291,4	-68,7	15,22
2009	139,3	14,414,6	-69,6	14,48
2010	-139,2	18,272,7	-67,3	18,07
2011	90,8	11,374,8	-67,3	11,40
Avg.	-189,7	17,393,4	-68,7	17,14

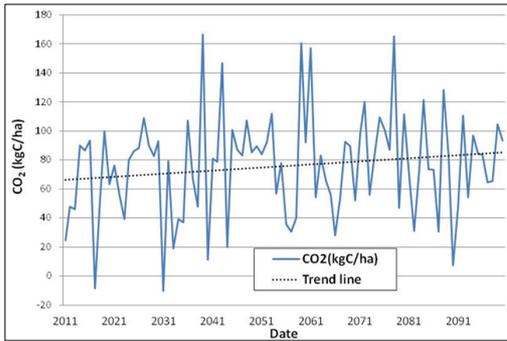


Fig. 3 The simulated results of CO₂ according to SRES A1B at field

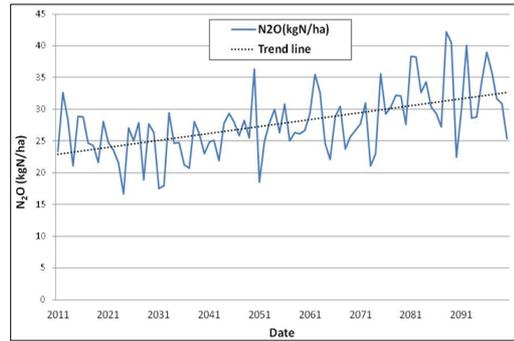


Fig. 5 The simulated results of N₂O according to SRES A1B at field

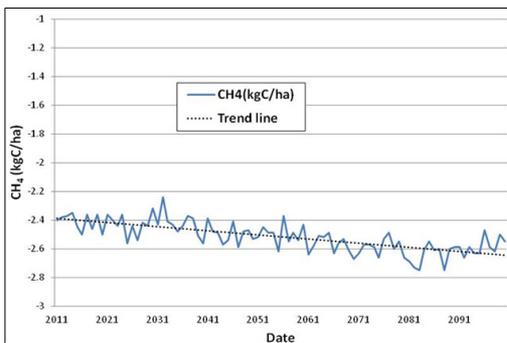


Fig. 4 The simulated results of CH₄ according to SRES A1B at field

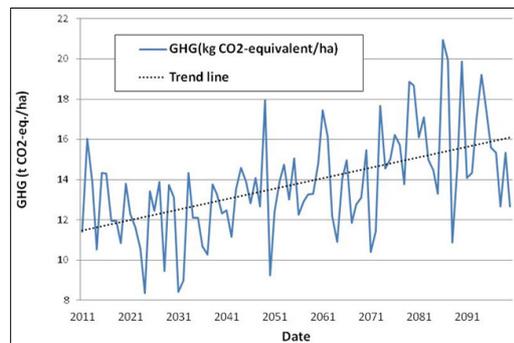


Fig. 6 The simulated results of GHG according to SRES A1B at field

아래의 상단부터 90 % 신뢰수준과 범위, 중간값 또는 평균값, 10 % 신뢰수준 등을 표현한다. Oh (2011)이 토지이용변화를 고려한 농경지의 온실가스 배출량을 모의한 연구에서 무밭에서 발생하는 N₂O의 배출량이 평균 2.6 kg N/ha/yr이 배출되는 양과 큰 차이가 있다. 이는 선행연구의 경우 작물생산량과 비료 시비량을 적게 추정하여 모의하였기 때문으로 판단된

다. 또한 Seo and Kang (2012)은 산림과 밭, 논 등의 토지이용도에 따른 N₂O 배출량을 측정된 결과 N₂O의 발생량이 가장 큰 지역은 밭이라고 하였으며, 평균발생량이 -0.0026 μmol/m²/hr (-0.00312 kg N/ha/yr)에서 최대 8.3 μmol/m²/hr (9.96 N kg/ha/yr)까지 발생한다고 하였다. 이는 6개월간의 짧은 기간 동안 측정된 결과로서 본 연구에서 분석한 연간 배

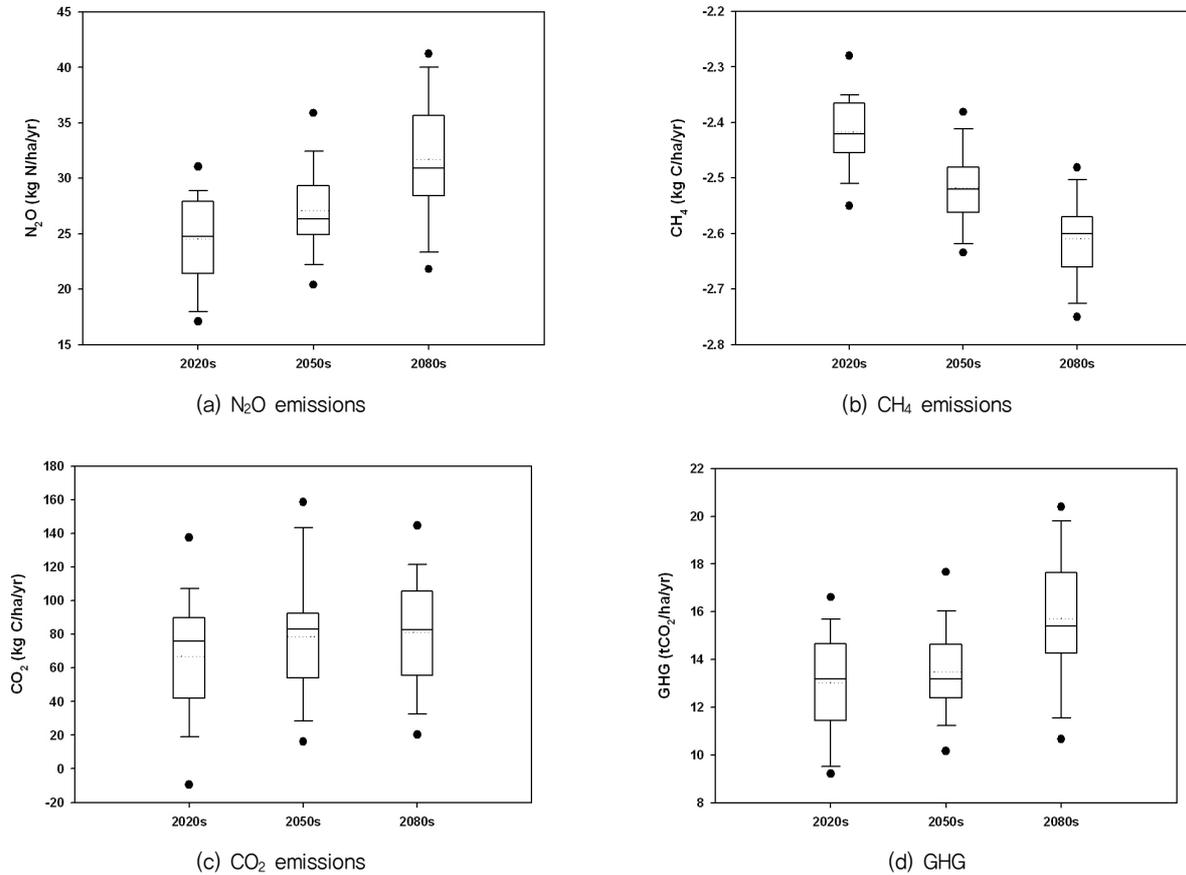


Fig. 7 The simulated results of GHG according to SRES A1B at field

Table 5 The simulated results of GHG and biomass according to SRES A1B at field

Period		Precip. (mm)	Temp. (°C)	Biomass (kg/ha/yr)	CO ₂ (kgC/ha/yr)	N ₂ O (kgN/ha/yr)	CH ₄ (kgC/ha/yr)
2020s	Avg.	1,367.7	11.72	3,214	66.95	24.54	-2.42
	Max	1,684.8	12.89	4,113	166.36	32.68	-2.24
	Min	987.0	10.82	2,165	-10.33	16.66	-2.56
2050s	Avg.	1,557.8	13.02	3,508	78.45	27.06	-2.52
	Max	2,136.2	14.44	4,136	160.51	36.30	-2.37
	Min	1,134.1	11.50	2,548	11.46	18.49	-2.64
2080s	Avg.	1,567.1	14.63	3,520	81.07	31.72	-2.61
	Max	2,203.7	15.60	4,138	165.13	42.19	-2.47
	Min	1,084.1	13.47	1,929	7.55	21.06	-2.75

출량과 큰 차이를 보였다.

연구지역의 CH₄ 배출은 없는 것으로 나타났으며, 토양이 2.24~2.75 kg C/ha/yr의 양을 흡수하는 것으로 나타났다. 기간별로 살펴보면 2020s에 평균 2.42 kg C/ha/yr, 2050s에 평균 2.52 kg C/ha/yr, 그리고 2080s에 평균 2.61 kg C/ha/yr의

양을 흡수하는 것으로 나타나 기후변화에 따라 CH₄ 흡수량이 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 4). 그러나 CO₂ 배출량은 -10.33~166.36 kg C/ha/yr로 나타났으며, 기간별로 살펴보면 평균 66.95 kg C/ha/yr (2020s), 평균 78.45 kg C/ha/yr (2050s), 그리고 평균 81.07 kg C/ha/yr (2080s)의 양을 배출

Table 6 The simulated results of GHG according to SRES A1B at field

Period		GWP (kg CO ₂ -equivalent/ha/yr)			GHG (t CO ₂ -eq./ha/yr)
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
2020s	Avg.	245.3	11,954.7	-67.8	12.1
	Max	609.5	15,919.8	-62.8	16.0
	Min	-37.8	8,115.8	-71.8	8.3
2050s	Avg.	292.4	13,239.9	-70.7	13.5
	Max	588.1	17,683.3	-66.5	17.9
	Min	73.3	9,007.3	-74.9	9.2
2080s	Avg.	302.8	15,480.9	-73.0	15.7
	Max	605.0	20,552.6	-69.3	20.9
	Min	27.7	10,259.2	-77.1	10.4

하는 것으로 나타나 CO₂의 배출량은 기후변화에 의해 점차 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 3). N₂O와 CH₄ 그리고 CO₂의 배출량을 고려한 GWP 배출량의 경우 Fig. 4~5의 (d)와 같이 8.3~20.9 t CO₂/ha/yr의 범위로 나타났으며, 기간별로 평균 12.1 t CO₂/ha/yr (2020s), 13.5 t CO₂/ha/yr (2050s), 그리고 15.7 t CO₂/ha/yr (2080s)의 온실가스가 배출되는 것으로 나타나 기후변화에 의해 밭에서 발생하는 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 기후변화에 의한 N₂O와 CO₂ 그리고 GWP는 강수량과 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, CH₄는 반비례하여 토양에 흡수되는 양이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Kim et al (2008, 2010)이 고추밭에서 온실가스 배출량을 측정할 결과 토양온도와 CO₂ 배출량에는 정의 상관관계가 있다고 하였으며, 토양수분과 온도가 높을수록 N₂O 배출량이 증가한다는 결과와 동일한 결과이다. 따라서 밭에서 발생하는 온실가스 저감을 위해서는 N₂O와 CO₂ 등에 중점을 두고 기후변화에 영향을 미치는 인자들의 저감을 위한 노력이 필요할 것으로 보여진다. 또한 밭의 경우 온실가스를 측정하는 시간과 주기 그리고 분석 방법에 따라 배출량이 각 연구자마다 매우 다양한 결과로 나타났으며, 강수량과 기온, 그리고 시비량 등의 다양한 조건에서 배출량이 변화되기 때문에 정확한 정량화를 위해서는 온실가스 배출량에 영향을 주는 토양의 깊이와 시비량 등에 대한 장기간의 분석과 노력이 필요할 것으로 보여진다.

재배작물, 토양특성, 경운방법, 비료와 거름 등의 영농방법에 따라 변화하는 온실가스 배출량을 모의한 결과는 Table 7~8과 Fig. 8~11과 같다. 모의 결과와 같이 CH₄의 배출 및 흡수량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 CO₂와 N₂O 그리고 GWP는 추비의 영향과 작물에 의한 변화가 적은 것으로 나타났다. 그러나 거름과 비료의 양이 증가할 경우 N₂O가 증가하여 온실가스가 증가하는 것으로 나타났으며, 밭갈이를

하지 않고 (무경운) 작물을 재배할 경우 N₂O 배출량이 증가하여 온실가스도 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Gregorich et al. (2005)의 연구에 의하면 무경운을 할 경우 토양의 탄소량이 항상 증가하지 않았다고 하였다. 이는 토양의 탄소 저장능에 영향을 주는 경운의 형태 또는 깊이, 토양의 상태, 탄소의 투입량, 그리고 토양 동물상 (soil fauna)에 따라 달라지기 때문이라고 하였다. 토양의 조건이 변화함에 따라 사양토 (Sandy loam)에서 실트질 함유량이 증가하거나 점토질 함유량 증가를 모의한 결과는 N₂O 배출량이 증가하여 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Kravchenko (2002)이 양질토양에 비해 사질토양의 경작지에서 N₂O 배출량이 낮아진다고 한 결과와 동일한 결과이다. 반대로 거름과 비료의 사용량이 감소할 경우 CO₂나 N₂O의 배출량이 감소하여 온실가스도 감소하는 것으로 나타났으며, 토양의 경우도 마찬가지로 사양토에서 양질사토 (loamy sand)로 토양을 변경할 경우 N₂O 배출량이 증가하여 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 밭에서 발생하는 배출량은 강수량과 온도에 의한 영향 뿐 아니라 비료와 거름 등의 사용량과 토양의 상태 (토성 및 경운)에 따라 온실가스 배출량이 변화하기 때문에 밭에서 발생하는 배출량을 줄이기 위해서는 작물을 재배하기 위한 적정 비료량을 살포하고, 또한 적절한 토성의 조건으로 작물을 재배하여 미래 기후변화에 따른 적절한 대응책으로 온실가스 배출량을 저감할 필요가 있을 것으로 보여진다.

IV. 결 론

본 연구는 영농실측자료와 모델을 이용하여 밭에서 발생하는 온실가스를 모의하고, 기후변화에 따른 밭의 온실가스

Table 7 The simulated results of GHG according to fertilizer and manure at field

Period	Crop	Fertilizer (kg N/ha)	Manure (kg/ha)	CO ₂ (kg/ha)	N ₂ O (kg/ha)	CH ₄ (kg/ha)	GHG (t CO ₂ -eq./ha)
2020s	R a d i s h	(350-15, 96)	1,800	15.4	26.7	-2.4	13.0
2050s				78.4	27.1	-2.5	13.5
2080s				81.1	31.7	-2.6	15.7
2020s			2,700	-94.4	31.9	-2.5	15.1
2050s				29.3	31.7	-2.7	15.5
2080s				41.8	37.6	-2.9	18.4
2020s			900	124.6	21.4	-2.3	10.8
2050s				128.6	22.2	-2.3	11.2
2080s				120.4	25.6	-2.2	12.8
2020s		(200-15, 96)	1,800	15.4	21.3	-2.4	10.4
2050s				78.5	21.7	-2.5	10.8
2080s				81.1	26.1	-2.6	12.9
2020s		(500-15, 96)		15.4	32.1	-2.4	15.6
2050s				78.4	32.4	-2.5	16.0
2080s				81.1	37.4	-2.6	18.4
2020s		(350-15, 50)		15.4	26.6	-2.4	12.9
2050s				78.5	27.0	-2.5	13.4
2080s				81.1	31.7	-2.6	15.7
2020s		(350-15, 150)	15.4	26.9	-2.4	13.1	
2050s			78.4	27.1	-2.5	13.4	
2080s			81.1	31.7	-2.6	15.7	
2020s		(350-15, 200)	15.4	27.1	-2.4	13.2	
2050s			78.4	27.1	-2.5	13.4	
2080s			81.1	31.8	-2.6	15.7	

Table 8 The simulated results of GHG according to cropping at field

Period	Crop	Tillage	Land-use	CO ₂ (kg/ha)	N ₂ O (kg/ha)	CH ₄ (kg/ha)	GHG (tCO ₂ -eq./ha)	
2020s	R a d i s h	Only mulching		-117.3	30.3	-2.6	14.3	
2050s				21.2	31.1	-2.8	15.1	
2080s				23.1	35.1	-3.0	17.1	
2020s		Ploughing with moldboard	Loamy sand		12.7	25.0	-2.6	12.1
2050s					87.4	25.2	-2.7	12.5
2080s					88.8	28.1	-2.7	13.9
2020s			Silt loam		9.7	32.2	-2.3	15.7
2050s					80.8	33.0	-2.4	16.3
2080s					85.0	39.8	-2.5	19.6
2020s			Loam		-9.8	39.1	-2.1	18.9
2050s					92.4	39.0	-2.2	19.3
2080s					98.5	46.4	-2.3	22.9

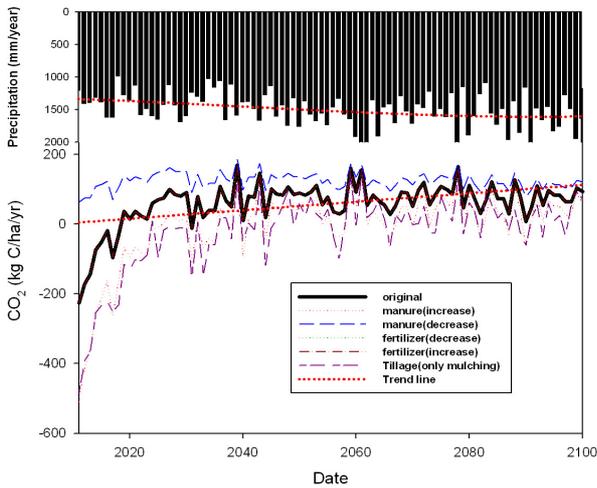


Fig. 8 CO₂ variation by fertilizer and manure applications at study field (manure inc.: increased application of manure (2,700 kg/ha); manure dec.: decreased application of manure (900 kg/ha); fertilizer inc.: increased application of fertilizer (500–15 kg/ha of urea and 96 kg/ha of nitrate); fertilizer dec.: decreased application of fertilizer (200–15 kg/ha of urea and 96 kg/ha of nitrate))

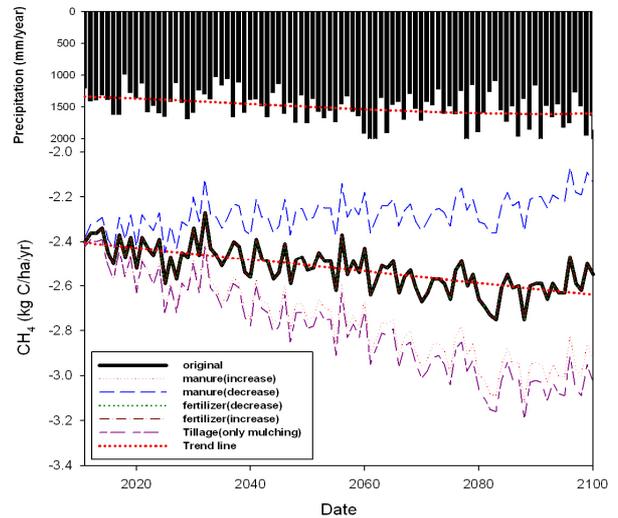


Fig. 10 CH₄ variation by fertilizer and manure applications at study field

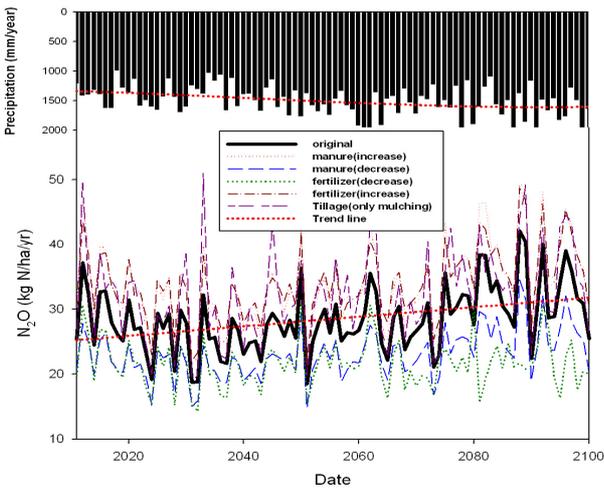


Fig. 9 N₂O variation by fertilizer and manure applications at study field

배출량과 배출량 저감 방안을 모색하였다. 온실가스 모의결과 GWP는 17.1 t CO₂-eq./ha/yr로 CO₂와 CH₄의 배출량은 증가하는 것으로 나타났으나, N₂O의 배출량이 감소하여 지구 온난화잠재력 (GWP)이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 기후변화에 따른 온실가스 변화는 GWP 8.3~20.9 t CO₂/ha/yr의 범위로 나타났으며, 기간별로 평균 12.1 t CO₂/ha/yr (2020s), 13.5 t CO₂/ha/yr (2050s), 그리고 15.7 t CO₂/ha/yr (2080s)의 온실가스가 배출되는 것으로 나타나 기후변화에 의해 밭에서

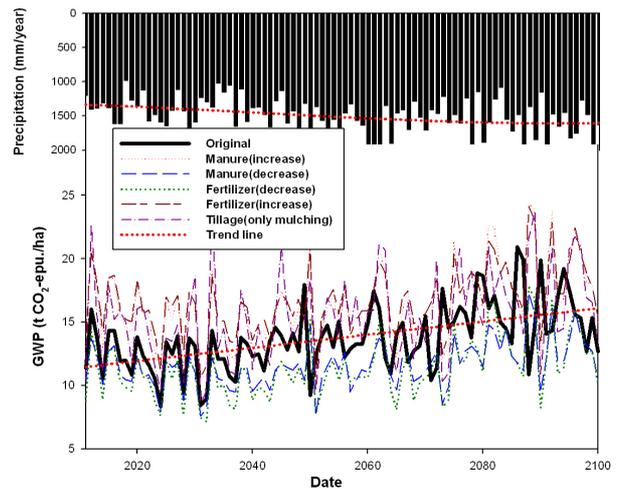


Fig. 11 GWP variation by fertilizer and manure applications at study field

발생하는 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 기후변화에 의한 N₂O와 CO₂ 그리고 GWP는 강수량과 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, CH₄는 반비례하여 토양에 흡수되는 양이 증가하는 것으로 나타났다. GWP는 추비의 영향과 작물에 의한 변화가 적은 것으로 나타났으나, 거름과 비료의 양이 증가할 경우 N₂O가 증가하여 온실가스가 증가하는 것으로 나타났으며, 밭갈이를 하지 않고 (무경운) 작물을 재배할 경우 N₂O 배출량이 증가하여 온실가스도 다소 증가하는 것으로 나타났다. 토양의 조건이 변화함에 따라 사양토 (Sandy loam)에서 실트질 함유량이 증가하거나 점토질 함유량 증가를 모의한 결과는 N₂O 배출량이 증가

하여 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 밭에서 발생하는 배출량은 강수량과 온도에 의한 영향 뿐 아니라 비료와 거름 등의 사용량과 토양의 상태 (토성 및 경운)에 따라 온실가스 배출량이 변화하기 때문에 밭에서 발생하는 배출량을 줄이기 위해서는 작물을 재배하기 위한 적정 비료량을 살포하고, 또한 적절한 토성의 조건으로 작물을 재배하여 미래 기후변화에 따른 적절한 대응책으로 온실가스 배출량을 저감할 필요가 있을 것으로 보여진다.

그러나 본 연구는 DNDC 모델의 적용성 평가와 검증을 위한 데이터가 충분하지 않은 상황에서 분석된 연구결과이기 때문에 정량적인 밭의 온실가스 배출량을 평가하기는 어렵다. 다만, 본 연구의 결과로 밭에서 발생하는 온실가스 배출 경향을 파악할 수 있으며, 비료와 거름 그리고 경운방법 등의 저감방안을 모색할 수 있을 것으로 보여진다. 따라서 밭에서 발생하는 온실가스의 장기적인 모니터링을 통하여 정량적인 결과를 도출할 필요가 있을 것으로 보여진다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Bouwman, A. F., 1995. Compilation of a global inventory of emissions of nitrous oxide, *Thesis Landbouwniversiteti Wageningen*. ISBN 90-5485-364-6, pp. 143
2. CAST, 1992. Preparing US Agriculture for Global Climate Change. Task Force Report. No. 119. P. E. Waggoner. Chair. *Council for Agricultural Science and Technology*. Ames, IA, USA. 96.
3. Dai, Z., C. C. Trettin, C. Li, H. Li, G. Sun, and D. M. Amaty, 2012. Effect of Assessment Scale on Spatial and Temporal Variations in CH₄, CO₂, and N₂O Fluxes in a Forested Wetland, *Water Air and Soil Pollution*. 223(1): 253-265.
4. Follador, M., A. Leip, and L. Orlandini, 2011. Assessing the impact of Cross Compliance measures on nitrogen fluxes from European farmlands with DNDC-EUROPE, *Environmental Pollution*. 159(11): 3233-3242.
5. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (<http://www.gir.go.kr>)
6. Gregorich, E., G., P. Rochette, A. J. VandenBygaart, and D. A., Angers, 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural

- soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil & Tillage Research*. 83: 53-72.
7. H. Li, L. G. Wang, J. J. Qiu, C. S. Li, M. F. Gao and C. Y. Gao, 2014. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of Northern China, *Geoderma*, 223-225: 108-118
8. IPCC, 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventoried: *Reference Manual, Revised in 1996*.
9. IPCC, 1997. Greenhouse gas emissions from agricultural soils. In: *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual; Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol. 3, Section 4.5 Agriculture (des Houghton JT et al), IPCC/OECD/IEA, UK Meteorological Office, Braknell, UK.
10. Iserman, K. 1994. Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposals for reducing this share. *Environ. Pollut.* 83: 95-111.
11. Jeon, B. B., J. G. Lee, E. H. Choi, S. H. Eun and T. S. Oh, 2007. Present Status and Prospect of Studies on Greenhouse Gases from Landfill, *Proceeding of the 45th Meeting of KOSAE*, pp.41-42. (in Korean)
12. Kim, G. Y., B. H. Song, K. A. Roh, S. Y. Hong, B. G. Ko, K. M. Shim and K. H. So. 2008. Evaluation of Green House Gases Emissions According to Changes of Soil Water Content, Soil Temperature and Mineral N with Different Soil Texture in Pepper Cultivation. *Korean journal of Soil Science and Fertilizer*, 41(6), pp. 399-407. (in Korean)
13. Kim, G. Y., K. H. So, H. C. Jeong, K. M. Shim, S. B. Lee and D. B. Lee, 2010. Assessment of Green House Gases Emissions using Global Warming Potential in Upland Soil during Pepper Cultivation. *Korean journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(6), pp. 886-891. (in Korean)
14. Korean Society for Atmospheric Environment, 1999. Survey of greenhouse gas emissions from environmental research infrastructures.
15. Korean Soil Information System (<http://asis.rda.go.kr/>)
16. Kravchenko, I., 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. Spatial data analysis. *Crop Science*, 42(3). pp. 804-815.
17. Kwack, Y. and Kobayashi, K, 2011. Application of DNDC model to estimate N₂O emissions from green tea fields in Japan, *Journal of crop science and biotechnology*. 14(2): 157-162.
18. Kwon, Y. A., W. T. Won, and K. O. Boo, 2008. Future Projections on the Spatial Distribution of Onset Date and Duration of Natural Seasons Using SRES A1B Data in South Korea, *Korean Geographical Society*. 43(1):36-51. (in Korean)
19. Lee, S. D., 2005. Evaluation of the Ecological Effect and Corresponding Strategy Due to Climate Change, *Korean*

- Society of Civil Engineers*. 53(4), pp.43-48. (in Korean)
20. Ministry of Environment, 2000. Greenhouse gas reduction potentials assessment of the environmental sector
 21. Ministry of Environment, 2000. Survey of greenhouse gas emissions from environmental research infrastructures.
 22. Ministry of Environment. 2002. Establishing greenhouse gas emissions in the environmental sector research and statistics
 23. Mosier, A. R. and J. M. Duxbury, .R. Freney, O. Heinemeyer and K. Minami, 1995. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*. (In press).
 24. Oh, Y. G., 2011. Assessment of green house gas emissions in cropland and forest considering land-use change affected by climate change. Doctorate thesis. *Seoul National University*. (in Korean)
 25. Park, K. S., E. S. Chung, S. U. Kim, and K. S. Lee, 2010. Impact Analysis of Construction of Small Wastewater Treatment Plant Under Climate Change, *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(2): 268-278. (in Korean)
 26. Rural Development Administration, 2010. Carbon emission can be controlled by farming method.
 27. Seo, J. Y. and H. J. Kang, 2012. N₂O Emissions with Different Land-Use Patterns in a Basin. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 34(2), pp. 86-90. (in Korean)
 28. The DNDC Model, (<http://www.dndc.sr.unh.edu>), 2012. User's Guide for the DNDC Model, Version 9.5, Institute for the Study of Earth, *Oceans and Space University of New Hampshire*.
 29. Wang, X., B. Zhu, C. Li, M. Gao, Y. Wang, Z. Zhou, and H. Yuan, 2011. Dissecting soil CO₂ fluxes from a subtropical forest in China by integrating field measurements with a modeling approach, *Geoderma*. 161(1-2): 88-94.
 30. Yun, D. K., S. O. Chung, and S. J. Kim, 2011. Climate Change Impacts on Paddy Water Requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 53(4): 39-47. (in Korean)